



# ポートホールダイ押出しにおけるダイ圧力分布と材料流れ

著者	金 英泰
号	2524
発行年	1999
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/7797">http://hdl.handle.net/10097/7797</a>

氏 名	きむ よんて 金 英泰
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成 12 年 3 月 23 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 材料加工プロセス学専攻
学 位 論 文 題 目	ポートホールダイ押出しにおけるダイ圧力分布と材料流れ
指 導 教 官	東北大学教授 池田 圭介
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 池田 圭介      東北大学教授 進藤 裕英 東北大学教授 花田 修治      東北大学助教授 村上 紘

## 論文内容要旨

近年, 環境負荷問題に対する関心や省エネルギー化の要求が高まりつつあり, 軽量, かつ再生性に優れたアルミニウム合金の中空材の需要および応用範囲はますます拡大している. 一方, アルミニウム合金の中空材にも小型薄肉化, 高強度化, 寸法の高精度化などが強く求められており, この要求に応えるべく, 中空材の製造法としてはポートホールダイ押出し法 (Porthole Die Extrusion) の占める割合が高くなる傾向にある. 現在, ポートホールダイ押出しの拡大適用を最も阻害しているのはダイ (Die) と言っても過言ではない. 即ち, 硬質アルミニウム合金をポートホールダイ押出し法で押出す場合, ダイ (特に分割ダイ) の変形や破損が激しいことなどの問題で, 一般に軟質アルミニウム合金のみに適用されており, 現段階において最も重要なのは, 試行錯誤的な従来のダイ設計手法の代わりに, 合理的なダイ設計の基準を確立することである.

ダイ設計時の基本的な必要事項としては, ダイ変形挙動および材料流動の把握が取り上げられる. ここで, ダイ変形挙動を正確につかむためには, ダイ圧力分布の把握が必要不可欠である. また, 材料流動を狙った通りに制御するためには, ビレット (Billet) からダイ出口までの材料流動に関する詳細な把握が必要であり, 材料流動に関する情報は次いでダイ設計に生かされる. さらに, 中空材には必要悪とも言える固相接合部が存在し, 接合部と関連した欠陥が多発しており, この欠陥の発生原因を究明することも緊急の課題である. しかし, ポートホールダイ押出しにおけるダイ圧力分布および材料流動を把握するための実験的手法は未だ確立されておらず, これを実現するには多くの工夫と時間を要する.

最近, 飛躍的な発展を遂げている有限要素解析をポートホールダイ押出しに適用すれば, パラメータスタディ (Parameter Study) やシミュレーション (Simulation) 機能を十分活用することによって, ダイ設計に有用な情報を得ることができ, ダイ設計において非常に強力な手段としての役割を果たすことができる. しかし, ポートホールダイ押出しの場合は, 3 次元, 大変形, 高温変形解析であるうえ, 工具との接触の多く, かつリメッシング (要素再分割, Remeshing) を要する解析であり, 3 次元解析の中でも最も難しい問題の範疇に属し, 解析は未だ初歩的段階にある. つまり, ポートホールダイ押出しに関する有限要素解析例は数少なく, リメッシング作業の手間を避けるため, 解析例のほとんどは定常状態のみにおける解析を対象としている.

以上の点を踏まえて, 本研究では以下のような研究内容を設定した.

- ・ 今まで行われていないものの, ダイ変形挙動を把握するうえで必須とも言えるポートホールダイ押出しの際, ダイに負荷される圧力分布の測定を試み, その傾向を把握する.
- ・ ダイ圧力分布の測定結果を取り入れ, ダイ変形に関する有限要素解析を行い, ダイ変形や破損部の予測および中空材の寸法精度の変化について検討する.
- ・ 材料流れに及ぼす諸押出し因子の影響を把握するとともに 3 次元のデッドゾーン (Dead Zone) 形状を明らかにす

る。

- ・ 定常状態における流線の作成ができるビレットの作製法を考案し、接合部に流れる材料の位置の特定を含め、材料流れをより具体化する。
- ・ 中空材の健全性を検討するうえで欠かせないビレット表面層の流れ挙動に及ぼす押出し因子の影響について調べるとともに、ビレット表面層と接合部欠陥との関連性を究明する。
- ・ 今まで報告例のないポートホールダイ押出しの全過程に対する有限要素解析を試み、実験結果との比較および実験から得にくい情報を確保する。

本研究から得られた知見を以下にまとめた。

## 第2章「ダイ圧力分布」

ダイ圧力分布を調べるため、同心円状のセレーション(Serration)形状を有する円盤状感圧素子の作製を試み、分割ダイ面上およびウェルディングチャンバー(Welding Chamber)底面上の圧力分布を測定した。本実験より、押出し工程(分割工程のみと定常状態)による分割ダイ面上の圧力分布の変化と定常状態におけるウェルディングチャンバー底面上の圧力分布に関する特徴的挙動が見出された。また、押出し中、工具に作用する力の釣り合いについて検討し、ダイ圧力の測定結果の信頼性を確かめた。

## 第3章「材料流れに及ぼす押出し因子の影響」

ポートホールダイ押出しにおける総体的な材料流れを把握するため、積層ビレット(流動応力値はほぼ同じでありながら、エッチング特性の異なる2種のアルミニウム合金板材を交互に積層したビレット)を用い、メタルフロー(Metal Flow)に及ぼす諸押出し因子の影響について調べた。メタルフローは諸因子が複合的に絡み合って変化し、中でもコンテナ(Container)摩擦の影響が大きいことが分かった。押出し工程、押出し温度および潤滑条件などによるコンテナ摩擦状態の変化の様子とビレット表面層のパンチ(Punch)面側への回り込み現象が確認され、定常状態では一見固着摩擦を思わせる状態を示すことが明らかになった。また、ダイ形状因子(分割ダイ形状、ウェルディングチャンバー深さ)によるメタルフローの変化は、基本的に材料と工具間の摩擦によって形成されるデッドゾーンの形状が変わった結果として生じることが見出された。さらに、第2章のダイ圧力分布とメタルフローとの関連性について考察し、両者間に良い対応関係があることが認められた。なお、材料の変形挙動の把握および理論解析を検証する上で非常に有用なデータである3次元のデッドゾーン形状を明確にした。

## 第4章「定常状態における材料流れ挙動」

本章では定常押出し状態における材料流動について、より詳細に把握するために、この目的に合うビレットの作製を試み、材料流動に関する情報を可視化した。実験結果より次のことが得られた。ビレット内の位置による材料の相対的な変位や全体的な流動の様子が視覚的、直感的に判断できるように示された。また、被加工材内での変形域形状(もしくはデッドゾーン形状)の変化の様相を明らかにした。さらに、定常押出し状態における流線を得て、接合面へ流れる材料の位置を特定した。

## 第5章「ビレット表面層の流れ挙動」

本章では、板材巻きビレット(ビレット表面部にエッチング特性の異なる薄い板材を巻き、つなぎ目を溶接したビレット)、線材埋め込みビレット(ビレット表面部にエッチング特性の異なる細い線材を埋め込んだビレット)を用い、押出し因子によるビレット表面層の流れ挙動について調べた。ビレット表面層の流れは二つのフローパターン(Flow Pattern)、即ち、ビレット後端部に沿ってビレット内部へ流れるインワードフロー(Inward Flow)とデッドゾーンの境界に沿ってポートホール壁面側へ流れるフォワードフロー(Forward Flow)に分類できた。また、両者の発生原因を究明す

るとともに、ビレット表面層の流れ挙動はコンテナ摩擦条件に大きく影響されることが確実となった。そして、パンチ面側へのビレット表面層の回り込み現象はインワードフローによって生じた現象であることも認められた。加えて、押出しストローク(Stroke)および継ぎ足し押出し(Billet to Billet Extrusion)によるビレット表面層の流れ挙動の調査より次のことが明らかになった。定常押出し状態では、ポートホール(Porthole)の中へ流出した表面層は押出し材の表面部へ流れていく。しかし、非定常状態まで押出されたビレットに継ぎ足しを行なうと、以前のビレットのインワードフローによる表面層が接合面へ流れていき、接合不良を引き起こす一因となる。つまり、押出し終期の非定常段階においてビレット表面層が接合部へ流れていく経路を見出すとともに、中空材の接合不良を改善する上で、押出しストロークの管理の重要性が示された。

## 第6章「ダイ変形の有限要素解析」

第2章のダイ圧力分布の測定結果を取り入れ、ダイ変形に関する有限要素解析を行い、以下の結果を得た。ダイ変形の面では分割ダイの方がキャップ(Cap)に比べ、はるかに厳しく、定常状態となると、分割工程のみの段階に比べ、分割ダイ形状(分割比)の影響が一層大きくなる。また、分割ダイにおいて、ダイ変形や破損が起こりやすい場所を特定した。本実験に用いたダイセットの場合、キャップの変形は中空材の寸法にあまり影響しないと判断された。なお、定常状態において分割ダイ下面に作用する圧力は分割ダイ上面の応力を軽減させる役割を果たすことが明らかになった。

## 第7章「ポートホールダイ押出しの有限要素解析」

本章では、押出し工程において応力分布、材料流動の変化が大きいと考えられる小穴ダイセットを対象に、リメッシング(Remeshing)方法を用いて、今まで報告例のないポートホールダイ押出しの非定常状態から定常状態にかけての全過程に対する有限要素解析を行った。デッドゾーンの形状とダイ圧力分布の様相に関して、解析結果は実験結果と良く対応しており、本解析の結果は信頼できると判断できた。また、実験からは得にくい情報である接合面における圧力分布が求められ、本解析の対象とした小穴ダイセットの場合、接合面での圧力は十分であり、押出し材(中空材)の接合不良は生じにくいと推定された。なお、変形の進行に伴う被加工材内部の応力やひずみ速度分布の変化について定量的知見が得られた。

ポートホールダイ押出しにおいて、ダイ設計の良否は中空材の品質(表面状態、接合強度、寸法精度など)や押出し速度など、総合的に押出し生産性を左右するものである。従来、試行錯誤的にダイ設計が行われてきたが、中空材の形状が複雑になるほどダイ設計に要する経費と時間が多大になるので、合理的なダイ設計の手法が強く望まれている。このことから、本研究ではダイ設計時の基本的な必要事項として挙げられるダイ変形挙動および材料流動について調べた。実際のポートホールダイ設計の際には、細かく考慮すべき事項はこれ以外にも多い。それゆえ、合理的なダイ設計の指針を得るためには、実験との対比により検証された数値解析手法を積極的に活用すべきであろう。しかし、実際の解析にあたって、現状の有限要素解析プログラムには多少の困難があるうえ多くの改善が残されており、解析結果をダイ設計に結び付けるためには、ポートホールダイ押出しの実態を熟知し、かつ解析に熟練した専門性が要求されることも事実である。

今後ポートホールダイ押出しの更なる発展はダイ設計にかかっているとも言える。現段階においてダイ設計に関しては、実験(系統的な事例蓄積)と数値解析手法を併用し、数値解析手法が従来の試行錯誤的に得られた技術を取り込む形で展開されれば、硬質アルミニウム合金、ひいてはより高強度の金属もポートホール押出しで実現できる日が早まるであろう。

## 審査結果の要旨

ポートホールダイ押出しは、多様な形状の中空材を高精度で加工できることから、アルミニウム合金の主要加工法の1つとなっているが、大きな圧力負荷によるダイ破損、固相接合部位の不適切な設定による加工欠陥が多発する。両者ともダイ設計が成否を握っているが、変形が複雑なため実験、理論解析ともに乏しく、ダイ設計に資する基礎的知見が欠如している。本研究は、ダイ面圧分布の計測法を提示してその有効性を確認するとともに、材料流れを初期非定常、定常、終期非定常段階に至るまで詳細に追跡して特有な挙動を明らかにした研究の経緯を纏めたもので、全編8章よりなる。

第1章は緒論であり、研究の背景、目的とその意義について述べている。

第2章では、これまで有効な手だてのなかった分割ダイ、キャップダイ双方の全面にわたる圧力分布を感圧素子法により精度よく計測できることを示し、初期非定常、定常の両変形過程におけるダイ圧力分布に及ぼす分割比の影響に関して新規な知見を得ている。

第3章では、押出し初期の分割のみの変形から定常変形に移行する段階で、潤滑剤の有無に関わらず、コンテナ、ポートホール壁面ともすべり摩擦から固着摩擦に変化し、それに伴ってせん断帯の発達、ピレット表面のパンチ面側への回り込みが起こることを明らかにしている。

第4章では、特殊な複合ピレットを作製して三次元的な流線を実験的に把握し、接合面に流動するピレット部位を特定している。

第5章では、押出し欠陥につながるピレット表面層の流れ経路として、パンチ面側に回り込んで内部に流動するインワードフロー、コンテナと分割ダイ角隅部のデッドゾーン界面に沿ったフォアワードフローの2種類があることを見出し、押出し材に至るまでの両者の流れ経路を明らかにしている。

第6章では、ダイの弾性変形解析を行った結果を述べている。分割比が小さくなると、押出し荷重、ダイ圧力ともに減少するが、剛性の低下によってむしろダイ変形が大きくなることを明らかにしており、押出し荷重とダイ変形の釣合いをとることがダイ設計上の要となることを述べている。

第7章では、これまで解析例がほとんどないポートホールダイ押出しの有限要素解析を試み、第2章から4章までの実験結果とよく一致する結果を得ることに成功しており、ダイの合理的設計に繋がる基礎的知見を提供している。

第8章は総括である。

以上、要するに本論文は、ポートホールダイ押出しにおけるダイ圧力分布を簡便、かつ精度よく計測する方法を確立するとともに、実験的、理論的解析によって特有の流れ挙動を明らかにし、ダイ設計上重要な数々の指針を与えており、材料加工プロセス学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、博士（工学）の学位論文として合格と認める。